

Article, Online First

Hache, Ingo; Karius, Volker; von Eynatten, Hilmar

Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule – Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß

Die Küste, 89 (Online First)

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:
KFKI - Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (Hg.)

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/108278>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Hache, Ingo; Karius, Volker; von Eynatten, Hilmar (2021): Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule – Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß. In: Die Küste, 89 (Online First). <https://doi.org/10.18171/1.089112>.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Messung, Bewertung und Einflussfaktoren der Trübung in der Wassersäule – Schlussfolgerungen für einen die Sedimentakkumulation optimierenden Küstenschutz auf Hallig Langeneß

Ingo Hache¹, Volker Karius² und Hilmar von Eynatten²

¹ Georg August Universität Göttingen; Geowissenschaftliches Zentrum, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie, ingo.hache@uni-goettingen.de

² Georg August Universität Göttingen; Geowissenschaftliches Zentrum, Abteilung Sedimentologie und Umweltgeologie

Zusammenfassung

Auf Hallig Langeneß wurde ein Trübungmessnetzwerk errichtet, welches aus sechs Stationen im Watt und zwei Stationen auf der Hallig von Februar 2017 bis März 2020 insbesondere in den Wintermonaten kontinuierlich Trübedaten geliefert hat. Ausgehend von den meteorologischen Parametern, wie Windrichtung und Windgeschwindigkeit, konnten die zeitliche und räumliche Variabilität des SPM (suspended particulate matter) um die Hallig bestimmt werden.

Es wurden bis zu elf „Land unter“ im Zeitraum von Dezember 2017 bis Februar 2020 einzeln erfasst und die Sedimentakkumulation auf der Hallig zeitgleich bestimmt. Mit Sedimentfallen konnten Sedimentakkumulationsraten hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen („Igel“) gemessen werden. Im Ergebnis konnten SPM-Gehalte vor der Halligkante gemessen werden, die zwar potentiell zur Sedimentakkumulation auf der Hallig beitragen könnten, aber – bedingt durch die jeweiligen Küstenschutzmaßnahmen – nur teilweise ausgeschöpft werden.

Der Einfluss der Halligrauhstreifen konnte durch Messung einerseits und Sedimenttransportmodellierung andererseits quantifiziert werden. Eine Anpassung der Küstenschutzbauwerke im Süden der Hallig hat das Potential, die Sedimentakkumulation auf der Hallig zu verdoppeln.

Schlagwörter

Trübungsmessung, SPM, Sedimentakkumulation, Sedimenttransportmodellierung, Deckwerk, Halligen

Summary

An autonomously operating network for turbidity measurements was developed and installed on Hallig Langeneß. Six units were placed on the tidal flats in front of the Hallig and additional two units were installed on the Hallig. Data were generated from February 2017 until March 2020. The spatial and temporal variability of the turbidity was assessed under consideration of meteorological and hydrodynamic

parameters. Up to eleven inundation events were recorded between December 2017 and February 2020 and for each event the sediment accumulation was measured with sediment traps on the Hallig. The influence of the coastal revetments, especially the height of the revetments, could be quantified by sediment trapping and sediment transport modelling. The suspended particulate matter which is available outside of the Hallig is only partially transported onto the Hallig during an inundation. An adjustment of the coastal revetments in the south of Langeneß may potentially increase the sediment accumulation by a factor of two.

Keywords

turbidity measurement, suspended particulate matter, SPM, sediment transport modelling, revetment, Halligen

1 Einleitung

Die nordfriesischen Halligen (Abbildung 1) sind Teil eines weltweit einzigartigen Ökosystems. Menschen, Tiere und Pflanzen bilden dort eine über mehrere Jahrhunderte gewachsene Einheit, die mitten im National Park Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer liegt. Seit 2009 gehört das Wattenmeer zum UNESCO Weltnaturerbe und die Halligen zur Entwicklungszone des UNESCO Biosphärengebietes Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer und Halligen. Der beschriebene Status dieser Region rechtfertigt vielfältige Forschungsaktivitäten, die auf den Erhalt des Gebietes zielen, die aber auch grundlegende Erkenntnisse zu dem Verhalten von unbedeichten Küstenvorländern im Kontext von sich ändernden Wasserständen liefern. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Höhenänderungen der Landoberfläche, die durch die Ablagerung von Sedimenten hervorgerufen werden. Zumeist in den Wintermonaten kommt es auf den größeren Halligen bis zu 15-mal zu „Land unter“ genannten Überflutungen (Schindler und Willim 2015). In den Projekten SAHall (Deicke et al. 2009) und ZukunftHallig (Schindler 2014, Schindler et al. 2014b, Schindler et al. 2014a) konnten die Sedimentakkumulation und die sedimentationsbedingten Höhenänderungen (Aufwuchsraten) für ausgewählte Halligen quantifiziert werden. Die Aufwuchsraten betragen demnach 1 bis 3 mm/Jahr und können somit den Anstieg des regionalen mittleren Tidehochwassers (MTHW) derzeit nicht kompensieren. Es ist möglich, dass bei weiter steigendem globalem Meeresspiegel die Wasserstände bei Extremereignissen im Wattenmeer sogar überproportional ansteigen werden (Arns et al. 2015a). Deshalb stellt sich die Frage, wie die Halligen mittelfristig gegenüber dieser Gefahrenlage abgesichert werden sollen. Während eines „Land unters“ wird das Überleben von Mensch und Vieh durch die Warften (auf Langeneß Warfen) sichergestellt. Dies sind Wohnhügel, deren Oberfläche ca. 3,5 m über MTHW liegt. Die notwendige Höhe der Warften hängt nicht nur von den Extremwasserständen ab, sondern auch vom Wellenauflauf während eines Sturmes. Der Wellenauflauf hängt dabei wiederum auch von dem Wasserstand auf der Hallig über der Geländeoberkante (GOK) ab. Insofern trägt ein Sedimentaufwuchs zu einer verbesserten Sicherheit für Mensch und Vieh auf den Halligen bei. Vier grundsätzlich unterschiedliche Strategien zur Sicherung des Habitats Hallig erscheinen denkbar:

- Erhöhung der Küstenschutzbauten bzw. Bau von Deichen (Minimierung des Überflutungsrisikos)

- Erniedrigung der Küstenschutzbauten (Erhöhung der Anzahl von „Land untern“ und damit der Sedimentation)
- Künstliche Erhöhung der Halligoberfläche durch Aufspülung von Sediment
- Steigerung des Sedimenttransportes auf die Hallig während eines „Land untern“, ohne die Anzahl von „Land untern“ nennenswert zu erhöhen.

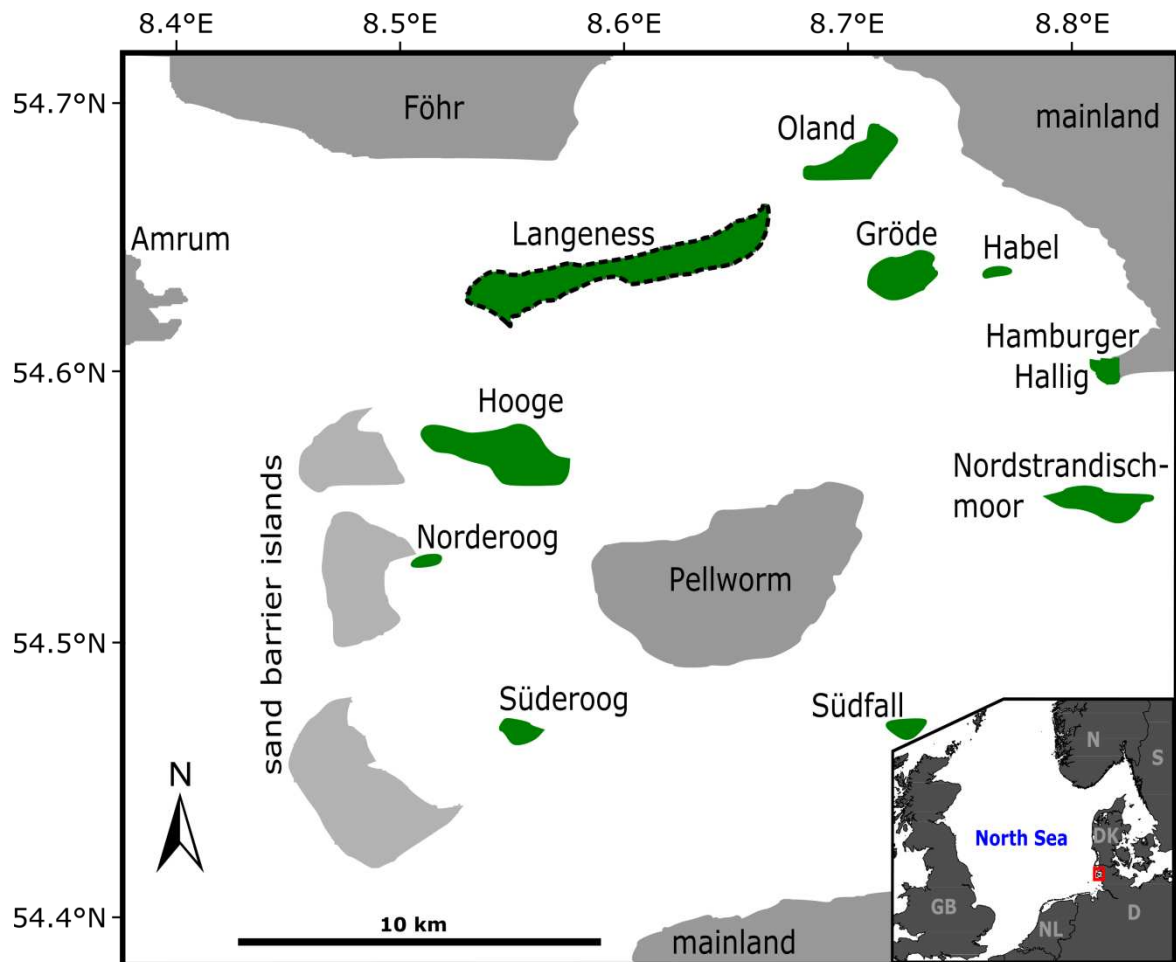


Abbildung 1: Karte des Arbeitsgebietes. Die Halligen sind in grün dargestellt. Die Arbeiten fanden ausschließlich auf Hallig Langeneß (gestrichelt) statt (nach Hache et al. 2021).

Die im Rahmen des vom BMBF geförderten Forschungsprojekts „Living Coast Lab“ vom Geowissenschaftlichen Zentrum, Göttingen, Abteilung Sedimentologie/Umweltgeologie auf der Hallig Langeneß durchgeführten Arbeiten dienen dazu, festzustellen, ob es ein ungenutztes Potential von Sedimenten gibt, die während eines „Land untern“ auf die Hallig transportiert werden könnten und damit zur Erhöhung der Halligoberfläche gegenüber dem Meeresspiegel beitragen. Als Arbeitshypothese wird angenommen, dass dieses Potential wegen der aktuellen Strategien zum Küstenschutz und der momentanen Wasserhaltung auf der Hallig nicht voll ausgeschöpft werden kann, weil die Trübstoffe nicht vollständig auf die Hallig gelangen oder dort nicht abgelagert bzw. wieder erodiert werden. Im Einzelnen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie lassen sich Trübedaten um Langeneß mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfassen, um durch geeignete Kalibration Feststoffgehalte (SPM) zu bestimmen?

- Wie werden SPM-Gehalte durch meteorologische und hydrodynamische Bedingungen beeinflusst?
- Wie korreliert SPM mit der Sedimentakkumulation auf der Hallig?
- Welchen Einfluss nehmen die Küstenschutzbauwerke auf die Sedimentakkumulation?
- Welche Maßnahmen können die Sedimentakkumulation auf der Hallig erhöhen?

2 Material und Methoden

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurde im Winter 2016/2017 ein Trübungsmesssystem entwickelt und um und auf Langeneß aufgebaut. In der Folge wurden schwerpunktmäßig in den Wintermonaten kontinuierliche Trübungsmessungen durchgeführt. Durch Sedimentsammler wurden bei „Land unter“-Bedingungen Sedimente in situ gewonnen, die zur Kalibration der Trübungmessdaten verwendet wurden. Zeitgleich wurde mit Sedimentfallen an ausgewählten Punkten der Hallig die Sedimentakkumulation erfasst. Dabei wurden „Land unter“-Ereignisse jeweils separat beprobt. Mit einem numerischen Detailmodell wurden schließlich verschiedene Szenarien mit unterschiedlichen Änderungen an den bestehenden Küstenschutzbauwerken und deren Einfluss auf die potentielle Sedimentakkumulation simuliert.

2.1 Trübungmesssystem

Das Messsystem besteht aus 6 autonom arbeitenden Messeinheiten, die im Watt innerhalb der Bühnenfelder, die Langeneß umgeben, installiert sind. Auf der Hallig befinden sich zwei weitere Messstationen, die während eines „Land unters“ Daten von dem Überflutungswasser liefern. Alle Stationen messen im Minutenabstand je einen Wert, und zwar in der Phase, in der sich der Messsensor vollständig unter Wasser befindet. Dies wird durch einen Wasserstandssensor gewährleistet. Sobald der Wasserstand unter das Niveau des Trübungssensors gesunken ist, endet der jeweilige Messzyklus und die Daten werden per Funk (ISM Band, 869 MHz) zu einer Zentralstation in der Halligmitte übertragen. Abbildung 2 zeigt exemplarisch eine Messstation.

Der Trübesensor ist ein OBS-3+ (campbell© scientific) und arbeitet nach dem IR-Rückstreu-Prinzip (Optical Back Scatter). Die Daten werden bis zur Funkübertragung im Datenlogger CR200X (campbell© scientific) gespeichert, der sich zusammen mit der Funkeinrichtung im Elektronikgehäuse befindet. Die Reinigungseinheit wischt zweimal zu Beginn des Messzyklus über den OBS-Sensor, um anhaftenden Schmutz zu entfernen. Von der Zentralstation werden die Daten über ein GSM-Modul an einen Server übertragen, von dem sie in Echtzeit abrufbar sind. Eine weitergehende Beschreibung geben Hache et al. (2019).

Eine Übersicht über die Lage aller Stationen und sonstigen Messeinrichtungen ist in Abbildung 3 dargestellt.

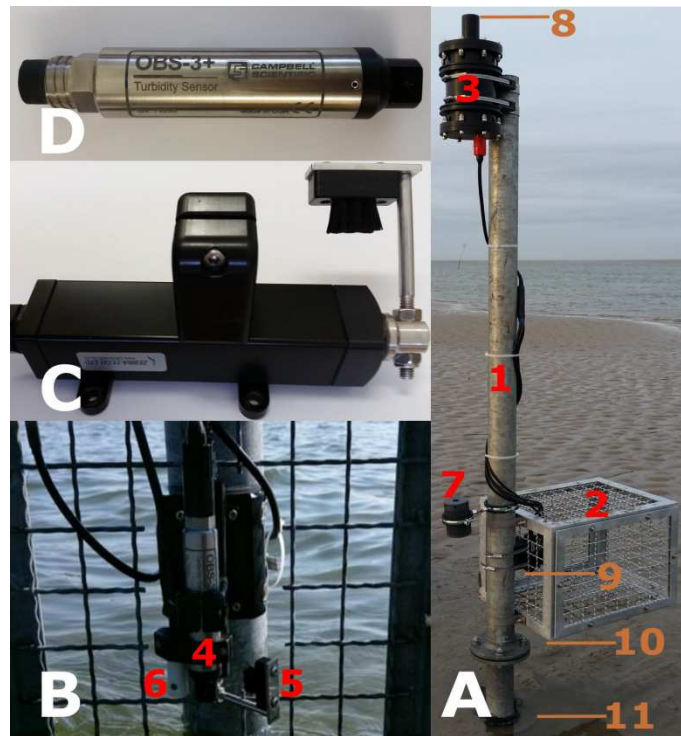


Abbildung 2: Messeinheit, bestehend aus Pfahl (1), Schutzkäfig mit Sensoreinheit (2), Elektronik-einheit (3), OBS3+ Trübesensor (4), Wischereinheit (5), Wasserstandssensor (6) und Sediment-sammler (7). Die Ziffern 8-11 bezeichnen Höhenmarken, die gegen NHN nivelliert wurden (nach Hache et al. 2019).

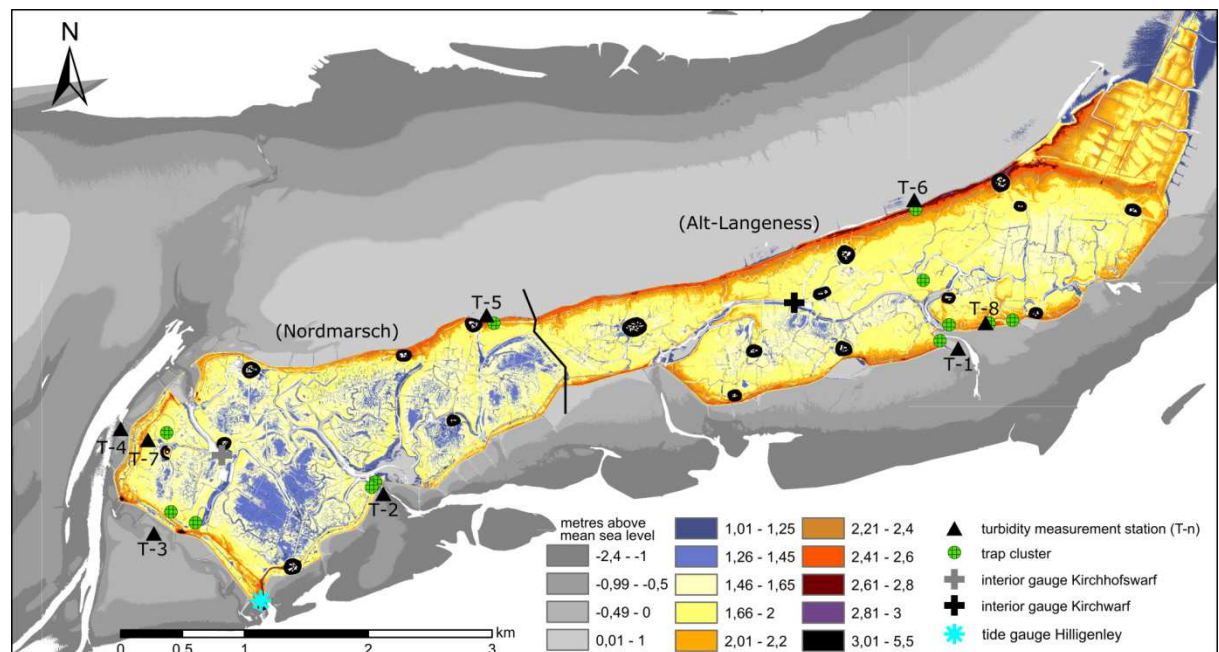


Abbildung 3: Digitales Höhenmodell von Langeneß mit Standorten von Pegeln, Sedimentfallen und Trübungsmessstationen (nach Hache et al. 2020).

Da die Zeiten der Wasserüberdeckung der Sensoren standortabhängig erheblich voneinander abweichen, sind die Gesamtmeßzeiten der einzelnen Stationen sehr unterschiedlich (Tabelle 1). Die Wattflächen liegen im Norden der Hallig um bis zu zwei Meter höher als im Süden, was sich in den deutlich geringeren Meßzeiten der Stationen T-5 und T-6

widerspiegelt. Die Station T-4 liegt direkt an einem Ausläufer des südlich an der Hallig vorbeilaufenden Prieles Süderau (Abbildung 3) und weist daher die längste Messdauer auf. Die Anzahl der erfassten „Land unter“ variiert geringfügig zwischen den Stationen T-1 bis T-6, was an gelegentlichen Ausfällen aufgrund von Wartung zu erklären ist. Auf der Hallig erfassen die Stationen T-7 und T-8 nur die „Land unter“, deren Wasserstand ausreicht, um den OBS-Sensor zu bedecken. Es wurden daher insgesamt elf „Land unter“ vollständig erfasst.

Tabelle 1: Messzeiten und Anzahl der erfassten „Land unter“ pro Messstation.

Station	Messzeit [Tage]	Anzahl „Land unter“
T-1	253	16
T-2	304	13
T-3	305	15
T-4	392	15
T-5	90	17
T-6	74	17
T-7	2	13
T-8	2	11

2.2 Kalibration der Trübesensoren

OBS-Sensoren müssen für eine möglichst präzise Messung von SPM-Werten regelmäßig mit dem in situ vorhandenen Material kalibriert werden (Sternberg et al. 1986, Downing und Beach 1989, Kineke und Sternberg 1992), da die gemessenen Trüberohdaten stark von der Korngröße der rückstreuenden Partikel abhängen (Down und Lehr 2005, Downing 2006). Dabei reicht es nicht aus, abgelagertes Sediment vor Ort zu beproben, da dieses teilweise um bis zu 5-mal gröber ist als das unter Messbedingungen suspendierte Material (Poerbandono und Mayerle 2005). Eigene Messungen konnten dies bestätigen.

Für eine regelmäßige Kalibration der Trübesensoren werden Sedimente benötigt, die den vor Ort in der Wassersäule vorhandenen Partikeln entsprechen. Diese Sedimente wurden in mehreren Sedimentsammlern aufgefangen, die in Höhe des OBS-Sensors an jeder Messstation angebracht wurden (Abbildung 2 und Abbildung 4). Die Sedimentsammler wurden nach dem Design IM+P (Ingenieur Büro Dr.-Ing. Manzenrieder und Partner GbR, <http://www.imp-ol.de>) in der Werkstatt des GZG gefertigt.

Zusätzlich zu den Sedimentsammlern in Höhe der OBS-Sensoren (Bottom) wurde jeweils ein Sammler am oberen Ende des Messpfahls befestigt (Top) um die Homogenität der Wassersäule bezüglich der Korngröße suspendierter Partikel zu untersuchen.

Die Sedimentsammler haben eine Kapazität von 350 cm³. Durch sechs kreisförmig angeordnete 8-mm-Einlassöffnungen im nach oben abgeschlossenen Sammler werden Partikel eingesammelt und sedimentieren im Sammler. Das Aspektverhältnis der zylindrischen Sammler beträgt 3:6 und erfüllt damit die Empfehlungen von Gardner (1980a, 1980b) um Resuspendierung weitestgehend zu vermeiden. Unter normalen Wetterbedingungen konnten die Sammler ca. einen Monat betrieben werden, bis sie geleert werden mussten. Während Sturmflutbedingungen waren die Sammler innerhalb weniger Stunden bis Tage gefüllt. Um die Sensoren mit den entsprechenden Sedimenten kalibrieren zu können, wurden die Sammler jeweils vor und nach jedem „Land unter“ beprobt.

Die eigentliche Kalibration der individuellen Sensoren wurde unter Laborbedingungen in einem zylindrischen Tank durchgeführt, in dem eine Suspension kontinuierlich umgewälzt wurde und der definierte Aliquote des zu kalibrierenden Sedimentes hinzugefügt wurde (Hache et al. 2019). Dieser Vorgang wurde für nahezu jedes beprobte „Land unter“ wiederholt. Die ermittelten Kalibrationsgeraden sind exemplarisch in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 4: Sedimentsammler nach Manzenrieder & Partner (nach Hache et al. 2019). A: Skizze des Sammlers mit innerem Prallrohr (gestrichelt), B: geschlossener Sammler, C: geöffneter Sammler.

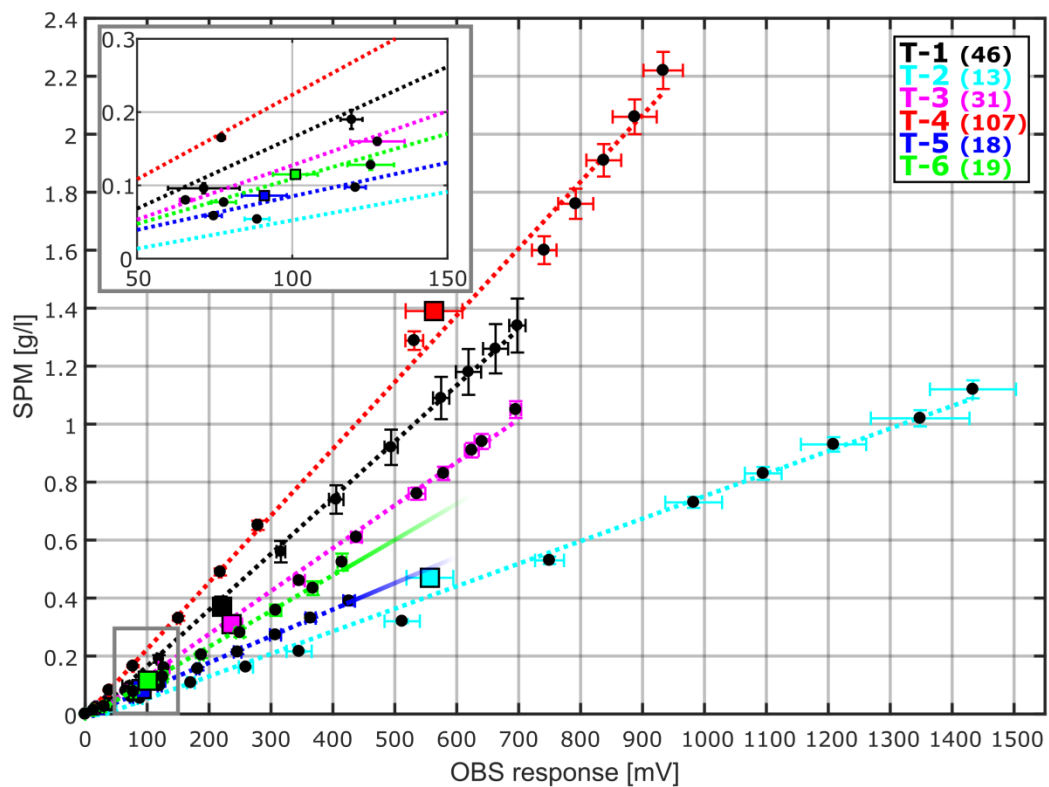


Abbildung 5: Kalibrationsergebnis für sechs Messstationen. Die Geraden decken den maximal vorkommenden SPM-Bereich ab (nach Hache et al. 2019).

2.3 Sedimentfallen

In den Wintermonaten wurde die Sedimentakkumulation in ausgewählten Bereichen der Hallig im räumlichen Bezug zu den Trübemessstellen mit Sedimentfallen bestimmt. Dazu wurden 14 Fallenfelder mit jeweils fünf 1L-LDPE-Flaschen sowie fünf Kunstrasenmatten angelegt (Abbildung 6). Eine ausführliche Beschreibung der Methode geben Schindler et al. (2014b). Die Fallenfelder wurden ca. 10 bis 500 m von der Halligkante entfernt installiert, in der Regel zwischen Halligrauhstreifen (Igel) und Sommerdeich (Abbildung 3), zusätzlich zwei Fallenfelder an den Trübemessstationen T-7 und T-8 und zwei Cluster jeweils im östlichen und westlichen Teil von Langeneß, welche schon im Projekt Zukunft Hallig betrieben wurden und repräsentativ für die durchschnittliche Sedimentakkumulation in diesem Bereich (Alt-Langeneß) sind (Schindler 2014).

In Bereichen, wo unterschiedlich hohe Igel aufeinandertreffen, wurden zwei Felder jeweils hinter dem höheren und dem niedrigeren Igel angelegt. Die Flaschen wurden unmittelbar vor einem „Land unter“ geleert und unmittelbar nach dem „Land unter“ beprobt. Die Matten wurden jeweils nach Ablauf einer Sturmflut-Saison (Oktober bis April) beprobt. Im Labor wurden die Sedimente entsalzt, getrocknet, gewogen, der Glühverlust bestimmt und die Partikelgrößen analysiert. Die Korngrößenanalytik wurde mit einem Laser Particle Sizer (LS 13320 Fa. Beckman & Coulter) durchgeführt. Dabei wurde ein Messbereich von 0,4 bis 2000 μm gemessen und die Beugungsdaten mit dem Fraunhofer-Modell in Kornverteilungen umgerechnet. Weitere Informationen zu den angewendeten Methoden geben Schindler et al. (2014b) und Hache et al. (2020).

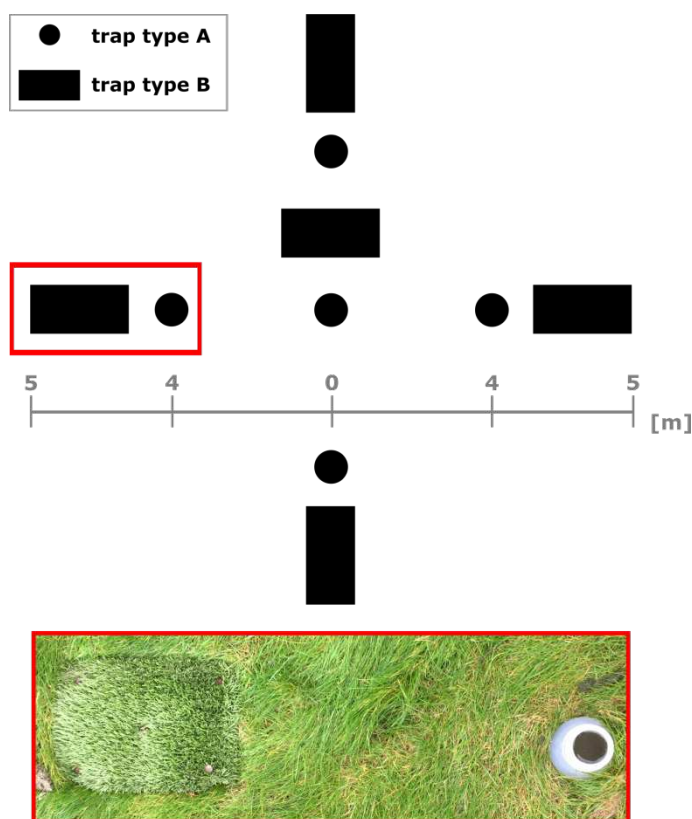


Abbildung 6: Sedimentfallenfeld mit 1L-LDPE-Flasche und Kunstrasenmatte (nach Hache et al. 2020).

2.4 Hydrologische und Meteorologische Daten

Wasserstandsdaten wurden an drei Pegelstandorten erhoben. Der Außenpegel Hilligenley liegt im Südwesten der Hallig Langeneß, direkt am Fähranleger, zwei Binnenpegel stehen auf der Hallig, einmal im Westen an der Kirchhofswarf und im Osten an der Kirchwarf (vgl. Abbildung 3). Signifikante Wellenhöhen werden an einer Wellenboje in der Süderau gesammelt. Die Pegel- und Wellendaten wurden vom LKN-SH für diese Studie zur Verfügung gestellt. Winddaten werden vom Deutschen Wetterdienst an der Wetterstation Strucklahnungshörn auf der Insel Nordstrand ca. 22 km südöstlich vom Pegel Hilligenley erhoben und wurden für diese Studie zur Verfügung gestellt.

2.5 Korngrößenkartierung

Um für die Modellierung des Sedimenttransportes notwendige Korngrößeninformationen zu erlangen, wurde eine Kartierung des Wattes um Langeneß durch Fingerprobe durchgeführt. Dazu wurden im Oberflächensediment zwischen den Buhnen die Hauptkomponente sowie bis zu zwei Nebenkomponeenten bestimmt (Carstens und Rüßmann 2018). Dabei wurde in Anlehnung an die Bodenkundliche Kartieranleitung vorgegangen (Bodenkundliche Kartieranleitung 2005). Einzelne Transsekte wurden bis in 5 cm Tiefe beprobt und im Labor mittels Laser-Diffraktion analysiert. Somit wurde auch die Korngrößeninformation mittels Fingerprobe überprüft.

2.6 Sedimenttransportmodell

Um Auswirkungen von Höhenänderungen von Küstenschutzbauwerken, insbesondere Igelhöhen, auf Sedimenttransport und Sedimentablagerung zu modellieren, wurde die Software MIKE21® vom Danish Hydraulic Institute (DHI, Warren und Bach 1992) verwendet. Mit dieser wurde am Forschungsinstitut Wasser und Umwelt (fwu) der Universität Siegen ein Detailmodell der Hallig Langeneß erstellt. Die hydrodynamischen Randbedingungen für das Detailmodell generierte ein bereits entwickeltes Regionalmodell der Nordsee und von Teilen des Nordatlantiks (Arns et al. 2015b, Arns et al. 2017). Diese Randbedingungen sind für jeden betrachteten Zeitraum individuell erzeugt worden und wurden ebenfalls vom fwu zur Verfügung gestellt. Folglich war es möglich, die hydrodynamischen Bedingungen von „Land unter“-Ereignissen im Detailmodell zu simulieren (detailliert in Hache et al. 2021). Jedes „Land unter“ wurde mit einer Woche *spin-up* Zeit bis einschließlich dem ersten auf das „Land unter“ folgenden Tidenzyklus simuliert. Anschließend konnten bei jeder betrachteten Simulation mit dem *particle tracking* (PT) Modul von MIKE21® Partikel eingesteuert werden, um suspendierte Sedimente und deren Verteilung während eines „Land unters“ zu simulieren. Diese Art der Partikelverfolgung hat sich zu einer bewährten Methode entwickelt, die erst kürzlich von Stanev et al. (2019) genutzt wurde, um die Ausbreitungswege von Meeresmüll in der südlichen Nordsee zu untersuchen.

Das verwendete hydrodynamische Modell, welches die Randbedingungen für das Detailmodell liefert, tendiert dazu, Sturmflutwasserstände zu unterschätzen (Arns et al. 2015b). Deshalb wurden für den angestrebten Vergleich zwischen moderatem „Land unter“ und „Land unter“ bei Sturmflutbedingungen und deren Auswirkung auf die

Partikelakkumulation nach unterschiedlichen Höhenanpassungen der Küstenschutzbauwerke zwei historische Ereignisse ausgewählt, deren modellierte Wasserstände den angestrebten Randbedingungen entsprechen. Für ein moderates „Land unter“ betragen die Scheitelwasserstände zwischen 0,92 und 1,5 m über MTHW und für Sturmfluten zwischen 1,5 und 2,5 m über MTHW. Das moderate „Land unter“ vom 05. März 2019 zeigte im Modell einen Scheitelwasserstand von 1,30 m über MTHW und die Sturmflut vom 24. November 1981 lieferte 1,83 m über MTHW. Als Referenz wurde der Pegel Dagebüll vom BSH mit einem MTHW von 1,42 m über NHN gewählt. Für diese beiden Ereignisse wurden die hydrodynamischen Bedingungen nach jeder Höhenanpassung der Küstenschutzbauwerke neu simuliert, um anschließend die Partikel einzusteuern und auszuwerten.

3 Ergebnisse

Im Rahmen der Studie konnten Erkenntnisse über die räumliche und zeitliche Verteilung der Trübe um Hallig Langeneß während unterschiedlicher meteorologischer Bedingungen gewonnen werden (Hache et al. 2019; Hache et al. 2020). Ergänzt werden diese Informationen um Korngrößendaten vom Wattboden, der als potentielle Quelle für die in Suspension befindlichen Partikel angesehen werden kann. Weiterhin konnten die Unterschiede bezüglich der Korngrößen im Watt, in der Wassersäule und in den Sedimentfallen aufgezeigt werden. Diese Daten lassen Rückschlüsse über den Sedimenttransport während eines „Land unters“ von außerhalb der Hallig auf die Hallig zu. Schließlich konnten Zusammenhänge hergestellt werden zwischen den Trübedaten vor der Hallig und den Sedimentakkumulationsraten auf der Hallig.

3.1 Trübedaten

Die von den OBS-Sensoren gemessenen Rohdaten wurden durch Kalibration in Konzentrationen von suspendiertem Material umgerechnet. Daher werden im Folgenden die Begriffe Trübe und SPM gleichbedeutend verwendet.

Es gibt wie erwartet deutliche Unterschiede zwischen der Trübe bei normalen Wetterbedingungen und bei stürmischen Bedingungen während eines „Land unters“. Es zeigen sich aber auch ausgeprägte Unterschiede in der räumlichen Verteilung, sowohl was die SPM-Konzentration als auch was die relativen Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Wetterbedingungen angeht (Abbildung 7). Alle Stationen zeigen einen deutlichen Anstieg der Trübe bei „Land unter“-Bedingungen. Dieser ist im Südwesten an der Station T-2 am geringsten und an den Stationen im Nordwesten (T-4) und Südosten (T-1) am stärksten ausgeprägt. Während die Trübewerte bei Schönwetter relativ konstant an den einzelnen Stationen sind, kommt es während stürmischem Wetter zu stärkeren Schwankungen.

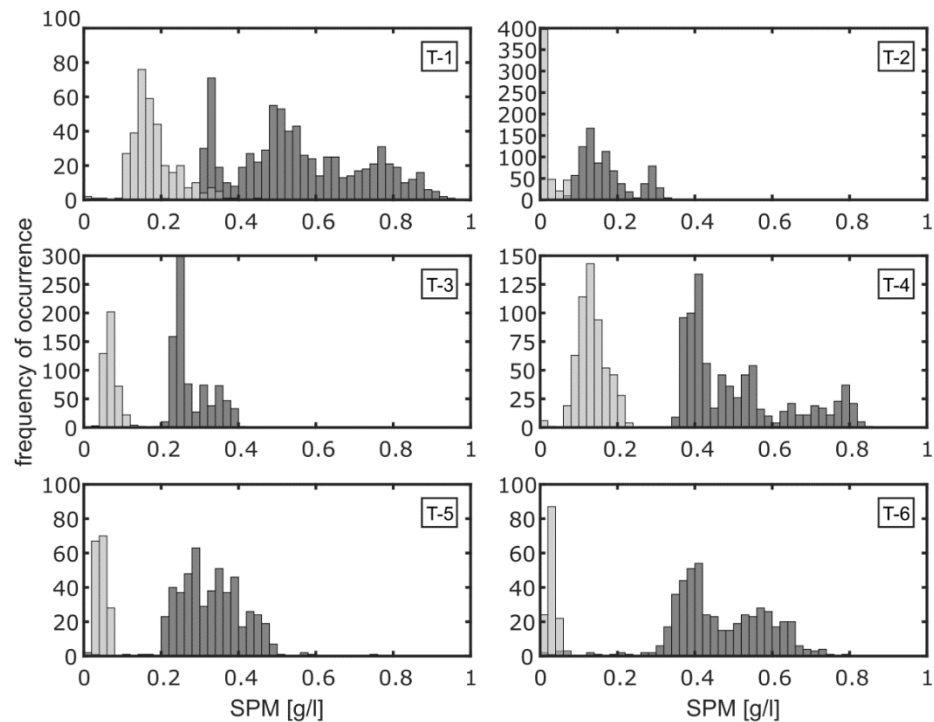


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilungen von SPM-Konzentrationen während jeweils zwei Tidenzyklen bei unterschiedlichen Wetterbedingungen. In hellgrau dargestellt ruhiges Wetter (30.11.2017) in dunkelgrau „Land unter“-Bedingungen am 11.02.2018 (nach Hache et al. 2019).

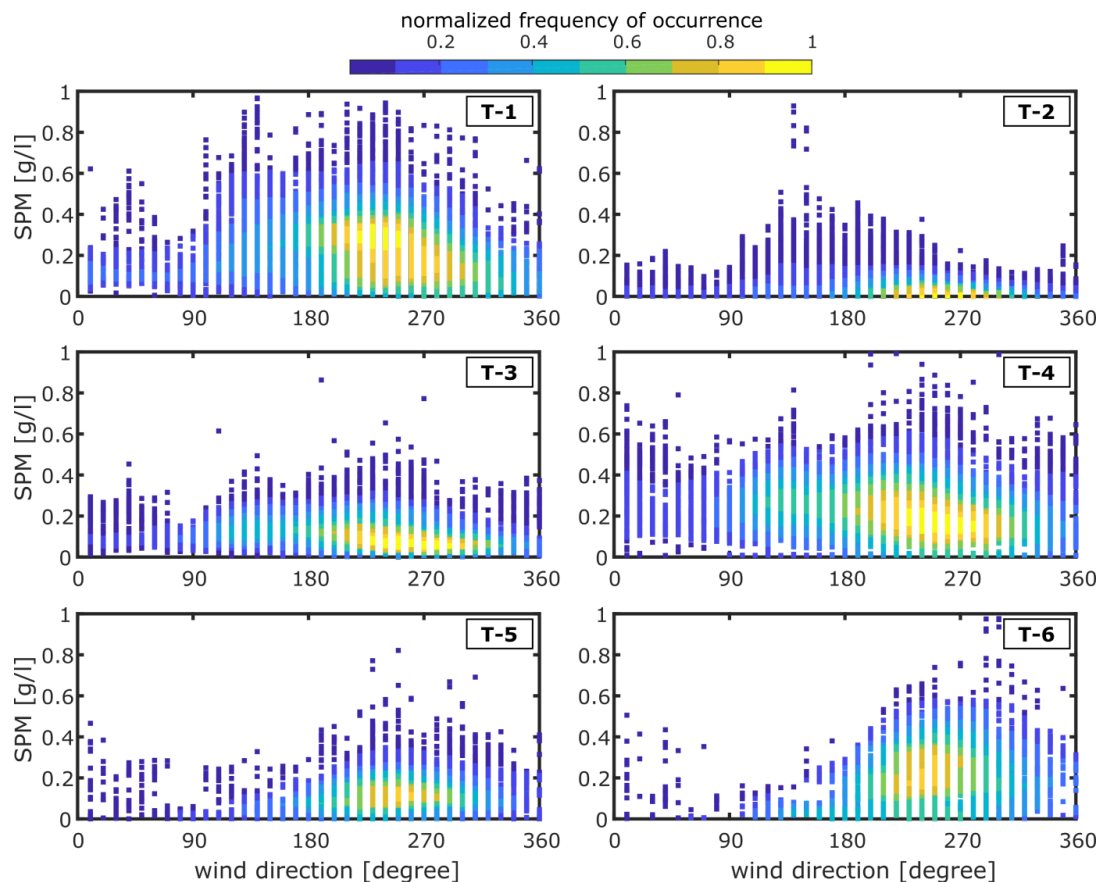


Abbildung 8: Dichteverteilung von SPM-Konzentrationen in Abhängigkeit von der Windrichtung. Es sind Daten aus dem Zeitraum 01.10.2017–15.02.2018 für sechs Trübungssstationen im Watt dargestellt (nach Hache et al. 2019).

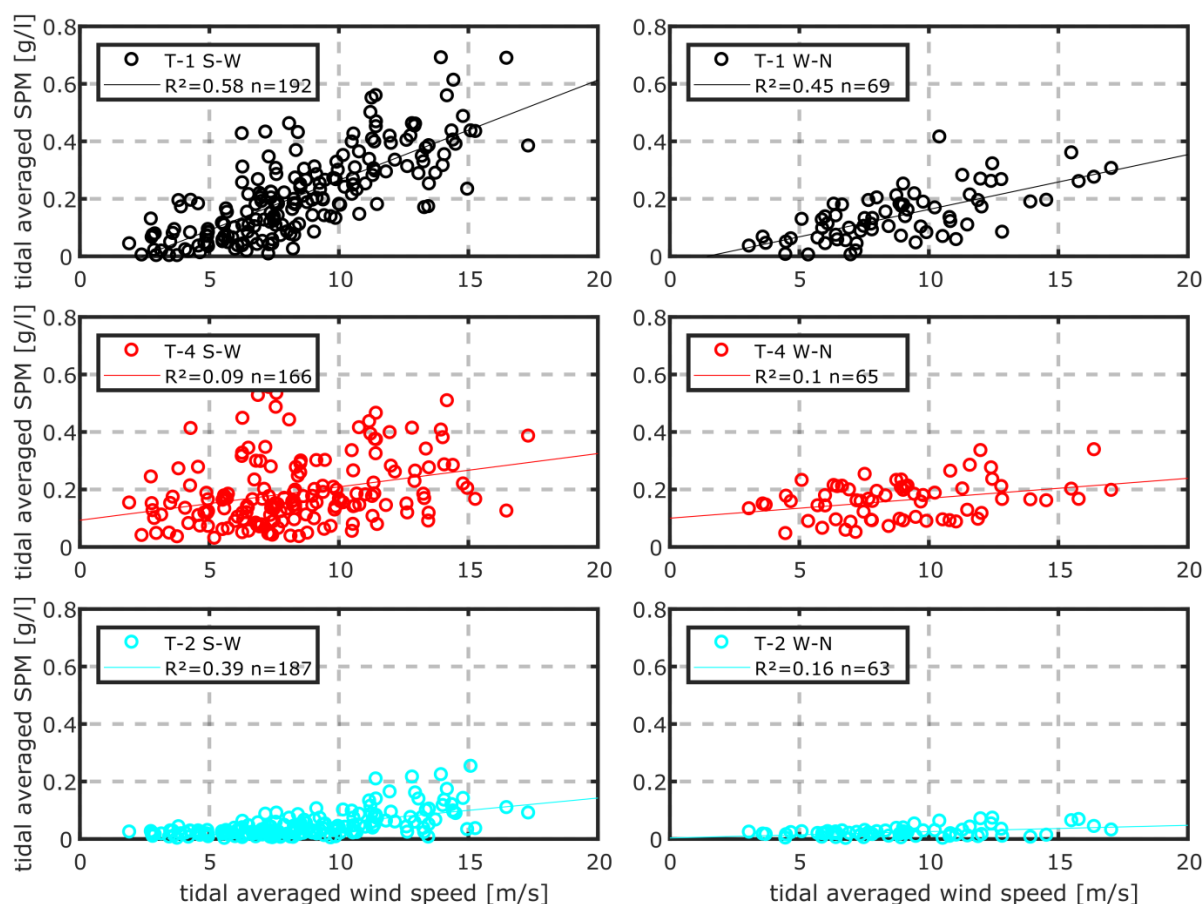


Abbildung 9: Zusammenhang von über einen Tidezyklus gemittelten Windgeschwindigkeiten und SPM-Konzentrationen. Es sind Daten aus zwei Wintern, 01.10.2017–15.02.2018 und 01.09.2018–01.03.2019, für drei Trübemessstationen im Watt dargestellt. R^2 ist der Korrelationskoeffizient nach Pearson und n die Anzahl der Messungen (nach Hache et al. 2020).

Betrachtet man die Windverhältnisse (Abbildung 8 und Abbildung 9), so zeigen die Dichteverteilungen der Trübe und der Windrichtung für alle Stationen Maxima bei Windrichtungen um W–SW. Die häufigsten SPM-Konzentrationen unterscheiden sich allerdings. Die Stationen T-1, T-4, und T-6 zeigen vergleichsweise hohe Werte zwischen 0,2 und 0,4 g/l, während die Stationen T-3 und T-5 nur Werte um 0,1 g/l zeigen. Die Trübe an der Station T-2 ist unter den hauptsächlich auftretenden Windrichtungen mit Werten deutlich unter 0,1 g/l am geringsten. An den Stationen T-1, T-3, T-5 und T-6 treten die maximalen SPM-Gehalte bei Windrichtungen auf, die auch im Maximum der Dichteverteilung vorliegen. Bei den Stationen im Westen der Hallig (T-3, T-4) sind die SPM-Werte deutlich weniger von der Windrichtung beeinflusst und zeigen auch bei anderen Windrichtungen als W–SW Maxima. Lediglich bei der Station T-2 treten die maximalen SPM-Werte abweichend von den vorherrschenden Windrichtungen auf. Hier spielt die geschützte Lage innerhalb des Bühnenfeldes, in dem die Station steht, die entscheidende Rolle. Da sich das Feld nach Südosten öffnet, treten die maximalen SPM-Werte bei der entsprechenden Windrichtung auf.

Die Windgeschwindigkeit beeinflusst die Trübe an den Stationen sehr unterschiedlich, sowohl bezüglich des Standorts als auch der Windrichtung (Abbildung 9). Während die Stationen im Süden der Hallig (T-1, T-2) bei Winden aus nordwestlicher Richtung kaum einen Zusammenhang mit der Windgeschwindigkeit zeigen, so steigt bei südwestlicher

Windrichtung die Trübe mit zunehmender Windgeschwindigkeit an. Die Station T-4 zeigt unabhängig von der Windrichtung nur einen schwachen Zusammenhang zwischen Trübe und Windgeschwindigkeit.

Die Unterschiede zwischen den Stationen können durch die an den jeweiligen Stationen herrschenden Strömungsverhältnissen erklärt werden. So liegen die Stationen T-4, T-3 und T-1 jeweils in der Nähe eines zur Süderauë führenden Prieles, während sich die Stationen T-5 und T6 in größerer Entfernung zur Norderaue befinden und daher wahrscheinlich stärker durch Seegang beeinflusst werden als durch Strömung. Die Station T-2 liegt in einem besonders engen Buhnenfeld in unmittelbarer Nähe zu einer Buhne und ist damit sowohl gegen Seegang als auch gegen Strömung relativ geschützt.

Aus diesen Informationen lässt sich zusammenfassend ableiten, dass es ein hohes Potential an Trübe bei südwestlicher Windrichtung gibt, welches insbesondere im Südosten der Hallig mit zunehmender Windgeschwindigkeit ansteigt. Die Trübewerte im Westen und Nordwesten der Hallig sind generell weniger stark vom Wettergeschehen beeinflusst.

3.2 Sedimentakkumulation

Die in drei Messwintern erfassten „Land unter“ sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt. Die Anzahl der erfassten „Land unter“ entspricht der Anzahl an vollständigen „Land unter“ nach der Definition von Schindler und Willim (2015) d.h. die Binnenpegel zeigen einen maximalen Wasserstand oberhalb der mittleren Höhe der nicht permeablen Deckwerke ($>2,34$ m NHN). Die Sedimentakkumulation pro „Land unter“ ist als Mittelwert über alle Sedimentfallen dargestellt. Die Werte gruppieren sich in zwei Kategorien. Werte zwischen 99 und 225 g/m² gehören zu den häufig vorkommenden „normalen“ „Land unter“-Ereignissen, die mit moderaten Wasserständen einhergehen. „Land unter“, die mit Sturmfluten einhergehen (Scheitelwasserstände $> \text{MTHW} + 1,5$ m) zeigen hier Sedimentakkumulationen zwischen 572 und 2112 g/m². Die Sturmfluten traten ausschließlich im Messwinter 2019/2020 auf, was sich auch an den deutlich erhöhten Sedimentaufwuchsraten von $5,9 \pm 3,8$ mm/a in diesem Jahr zeigt.

Der Mittelwert aller Sedimentaufwuchsraten im Projektzeitraum beträgt $2,4 \pm 1,8$ mm/a und liegt damit deutlich über dem Wert von $1,2 \pm 0,8$ mm/a, der als Mittelwert (2010–2013) für Langeneß angegeben ist (Schindler et al. 2014a). Die Diskrepanz ist dadurch zu erklären, dass in dieser Studie absichtlich nahezu alle Sedimentfallen in unmittelbarer Nähe zur Halligkante platziert wurden, während in der Arbeit von Schindler et al. (2014a) die Fallen gleichmäßig über Langeneß verteilt waren. Die Sedimentation ist kantennah deutlich höher als in der Halligmitte. Zusätzlich wurden aber auch zwei zentral gelegene Fallencluster beprobt, die nach Schindler et al. (2014a) als repräsentativ für die Hallig anzusehen sind. Der 4-Jahres-Mittelwert der zentralen Fallenfelder FF1 und FF2 beträgt 1.17 ± 0.22 mm/a und ist damit vergleichbar mit den Werten der älteren Arbeit.

Tabelle 2: Hydrodynamische, meteorologische und sedimentologische Charakteristika der erfassten „Land unter“ im Zeitraum 08.12.2017–13.02.2020.

Inundation	wind speed [m/s]	wind direction [degree]	significant wave height [m]	av SPM [g/l]	mean M_s accumulation [g/m ²]	mean inundation height [m above m.s.l.]
1. (08.12.2017)	8.1 ± 2.6	268.9 ± 19.8	0.41 ± 0.11	0.19 ± 0.12	132.8 ± 90	2.46 ± 0.01
2. (04.01.2018)	10.7 ± 3.8	280.6 ± 8.7	0.48 ± 0.19	0.28 ± 0.17	158.6 ± 84.4	2.74 ± 0.02
3. (12.02.2018)	14.2 ± 1.7	243.3 ± 11	0.69 ± 0.11	0.39 ± 0.15	179.6 ± 118.5	2.61 ± 0.01
4. (08.12.2018)	14.6 ± 1.5	239.5 ± 12.5	0.72 ± 0.13	0.19 ± 0.13	100.6 ± 71.7	2.49 ± 0.04
5. (08.01.2019)	14.5 ± 2.3	332.1 ± 12.9	0.62 ± 0.11	0.16 ± 0.1	99.2 ± 50.2	2.79 ± 0.05
6. (09.02.2019)	17.3 ± 1.4	227.1 ± 7	0.74 ± 0.14	0.32 ± 0.18	224.8 ± 206.5	2.3 ± 0.16
7. (05.03.2019)	15.4 ± 2.8	251.6 ± 3.7	0.77 ± 0.14	0.23 ± 0.18	172.8 ± 167.5	2.51 ± 0.04
8. (10.03.2019)	11.4 ± 10.8	256 ± 3.6	0.54 ± 0.25	0.13 ± 0.09	79.9 ± 58.5	2.49 ± 0.06
9. (15.12.2019)	16 ± 4.7	245.3 ± 10.4	NaN	NaN	1154.2 ± 833.9	3.37 ± 0.12
10. (15.01.2020)	15.5 ± 0.1	201 ± 3.1	NaN	NaN	572 ± 419.2	3.16 ± 0.08
11. (10-13.02.2020)	15.9 ± 0.8	263.7 ± 5.4	NaN	NaN	2112.2 ± 1127.6	3.32 ± 0.37

Tabelle 3: Sedimentaufwuchs der erfassten „Land unter“ (LU) im Zeitraum 08.12.2017–13.02.2020 und Überflutungshöhen an den Binnenpegeln Kirchhofswarf (KHK) und Kirchwarf (KW).

Winter	Erfasste LU	ΔH [mm/a]	Mittlere Überflutungshöhe KHW [m NHN.]	Mittlere Überflutungshöhe KW [m NHN.]
16/17	6	1.9 ± 1.9	2.9 ± 0.41	2.94 ± 0.45
17/18	3	0.9 ± 0.5	2.5 ± 0.21	2.44 ± 0.35
18/19	5	1 ± 0.9	2.46 ± 0.2	2.56 ± 0.15
19/20	3	5.9 ± 3.8	3.24 ± 0.33	3.36 ± 0.31
Mittelwert		2.4 ± 1.8	2.78 ± 0.29	2.83 ± 0.32

3.2.1 Einfluss der Halligrauhstreifen

Assoziiert zu den Trübemessstationen T-1, T-2 und T-3 befinden sich jeweils zwei Sedimentfallencluster, die hinter unterschiedlich hohen Igeln liegen. Die Igelhöhen wurden den entsprechenden Katastern des LKN-SH entnommen und sind zusammen mit der mittleren Sedimentakkumulation in Tabelle 4 dargestellt. Eine nach einzelnen „Land untern“ differenzierte Darstellung der Sedimentakkumulation zeigt Abbildung 10.

Tabelle 4: Sedimentologische und morphologische Merkmale der Sedimentfallencluster hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen (H = hoch, L = niedrig) im Süden der Hallig Langeneß.

trap cluster	barrier height [m]	distance to Hallig margin [m]	average Ms accumulation [g/m ²]	average inundation SPM [g/l]
1H	2.69±0.14	30	263±132	0.34±0.12
1L	2.22±0.04	40	329±151	0.34±0.12
2H	3.58±0.23	32	75±32	0.06±0.05
2L	3.2±0.11	33	149±49	0.06±0.05
3H	3.24±0.06	120	43±21	0.14±0.07
3L	2.87±0.11	121	176±46	0.14±0.07

Die Differenz zwischen den jeweiligen Igelhöhen beträgt 37 bis 47 cm und ist damit in etwa vergleichbar hoch. Sowohl die mittlere als auch die individuellen Sedimentakkumulationen sind immer höher hinter dem jeweils niedrigeren Igel. Dabei profitieren offenbar besonders die Regionen, in den eher geringe Sedimentakkumulationen vorliegen (T-2, T-3) prozentual stärker, wenn die Igelhöhe geringer ist. Die absolute Höhe der Igel korreliert offenbar negativ mit der mittleren Sedimentakkumulation, so werden z. B. die höchsten Sedimentakkumulationen in der Region T-1 hinter den niedrigsten Igeln gemessen und die niedrigsten Akkumulationen hinter den deutlich höheren Igeln in der Region T-2 und T-3.

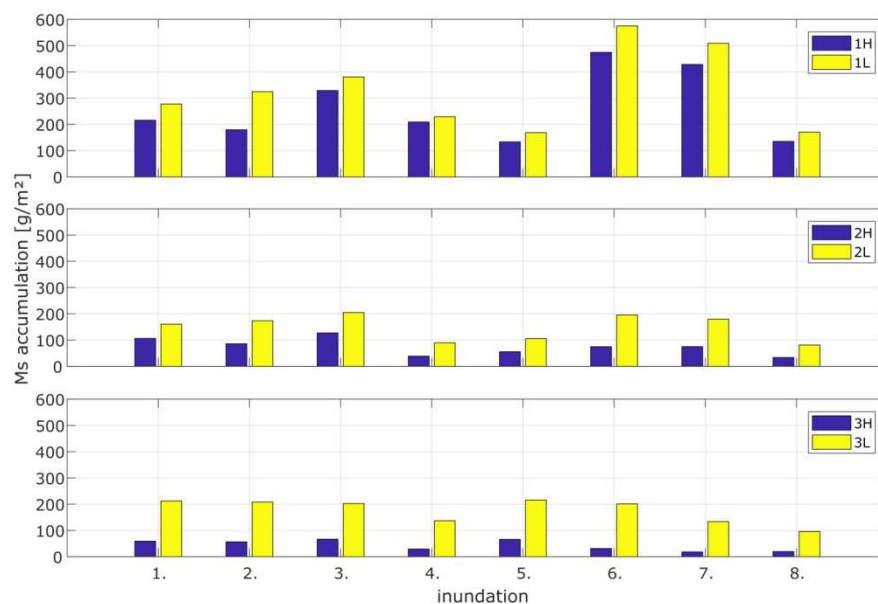


Abbildung 10: Sedimentakkumulation hinter unterschiedlich hohen Halligrauhstreifen „Igel“ bei einzelnen „Land untern“ im Zeitraum 08.12.2017–10.03. 2019 (nach Hache et al. 2020).

Die Igelhöhe wirkt sich auch auf die Korngröße des abgelagerten Sedimentes aus. Die durchgeführte Wattkartierung erbrachte das Ergebnis, dass das Watt um Langeneß im Wesentlichen von Feinsand mit leicht variierenden Siltanteilen dominiert ist. Lediglich an der Station T-2 liegen tonig Silte vor und an der Station T-4 Mittelsande. Während unter Schönwetterbedingungen hauptsächlich die Siltanteile in Suspension gehen, werden unter Wetterbedingungen, die zu „Land untern“ führen, verstärkt auch die Sandanteile des Sedimentes resuspendiert. Abbildung 11 zeigt die einzelnen Kornfraktionen exemplarisch

an der Messstation T-1 und den assoziierten Sedimentfallenclustern während der „Land unter“ 3 und 6 (vgl. Tabelle 2). Die dominierende Korngröße in den Sedimentsammlern ist hier Feinsand. Der geringe Unterschied zwischen den jeweiligen Sammlern „Top“ und „Base“ zeigt, dass die Wassersäule wahrscheinlich gut durchmischt ist in Bezug auf die Korngröße der suspendierten Partikel. In Sedimentfallen hinter den Halligrauhstreifen dominieren gleichzeitig Grobsilt und Feinsand. Allerdings zeigt sich hier ein deutlicher Unterschied zwischen Sedimentfallen hinter hohem und niedrigem Igel. Während hinter dem hohen Igel Grobsilt die häufigste Korngröße ist, so ist es hinter dem niedrigen Igel Feinsand. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Halligkante generell ein Hindernis für den Sedimenttransport darstellt und dass insbesondere grobe Partikel sowohl von der Halligkante als auch von den Halligrauhstreifen davon abgehalten werden, auf die Hallig zu gelangen. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmender Igelhöhe.

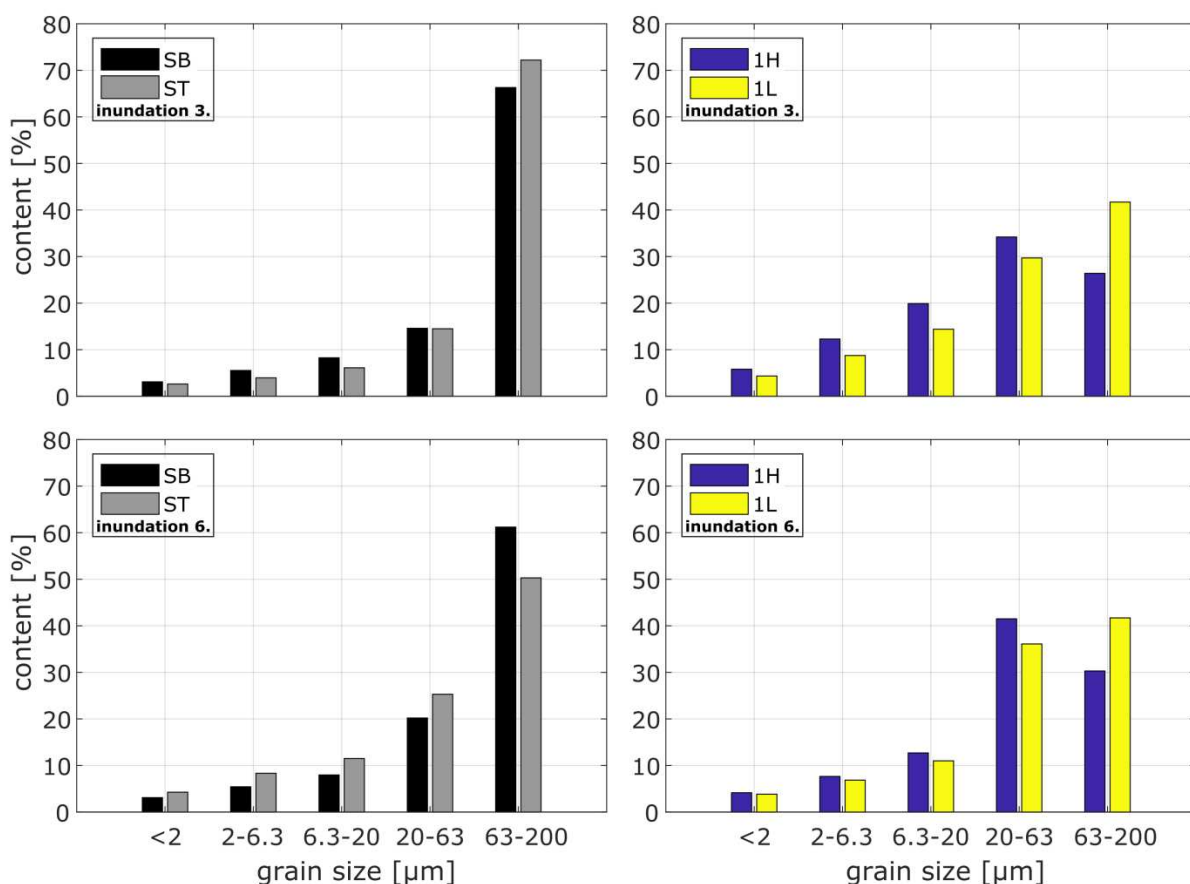


Abbildung 11: Korngrößenverteilung der Sedimentsammler (links), differenziert nach Top (ST) und Base (SB) an der Messstation T-1 bei zwei ausgewählten „Land untern“ (vergl. Tabelle 2) und der Sedimentfallencluster (rechts) hinter unterschiedlichen hohen Halligrauhstreifen „Igel“ im Bereich der Messstation T-1 (nach Hache et al. 2020).

3.3 Sedimentverfügbarkeit

Die zentrale Frage der Studie lautet, ob es ein Potential an verfügbaren Sedimenten gibt, die zwar im Watt resuspendiert werden, aber nicht auf die Hallig transportiert werden. Da die Untersuchungen zur räumlichen Verteilung der Trübe gezeigt haben, dass die Trübewerte rund um die Hallig stark variieren und auf der Hallig nur zwei Messstationen zur

Verfügung stehen, wurden die Trübungswerte der Stationen auf der Hallig nur mit den dazu räumlich assoziierten Messstationen im Watt verglichen. Dementsprechend wurden Messungen des SPM-Gehaltes an den Stationen T-1 mit denen der Station T-8 bzw. T-4 mit T-7 (vgl. Abbildung 3) verglichen, die während der erfassten „Land unter“ gewonnen wurden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12 dargestellt. Mit steigenden Trübungswerten im Watt erhöhen sich auch die SPM-Gehalte im Überflutungswasser auf der Hallig. Es zeigt sich aber, dass die Messstationen auf der Hallig nur in etwa 10 bis 50 % der im Watt gemessenen Trübe detektieren. Die „Effektivität“ eines „Land unters“ bezüglich des Sedimenttransportes steigt dabei offenbar mit der Stärke des „Land unters“, wenn als Maß dafür die Trübungswerte im Watt herangezogen werden.

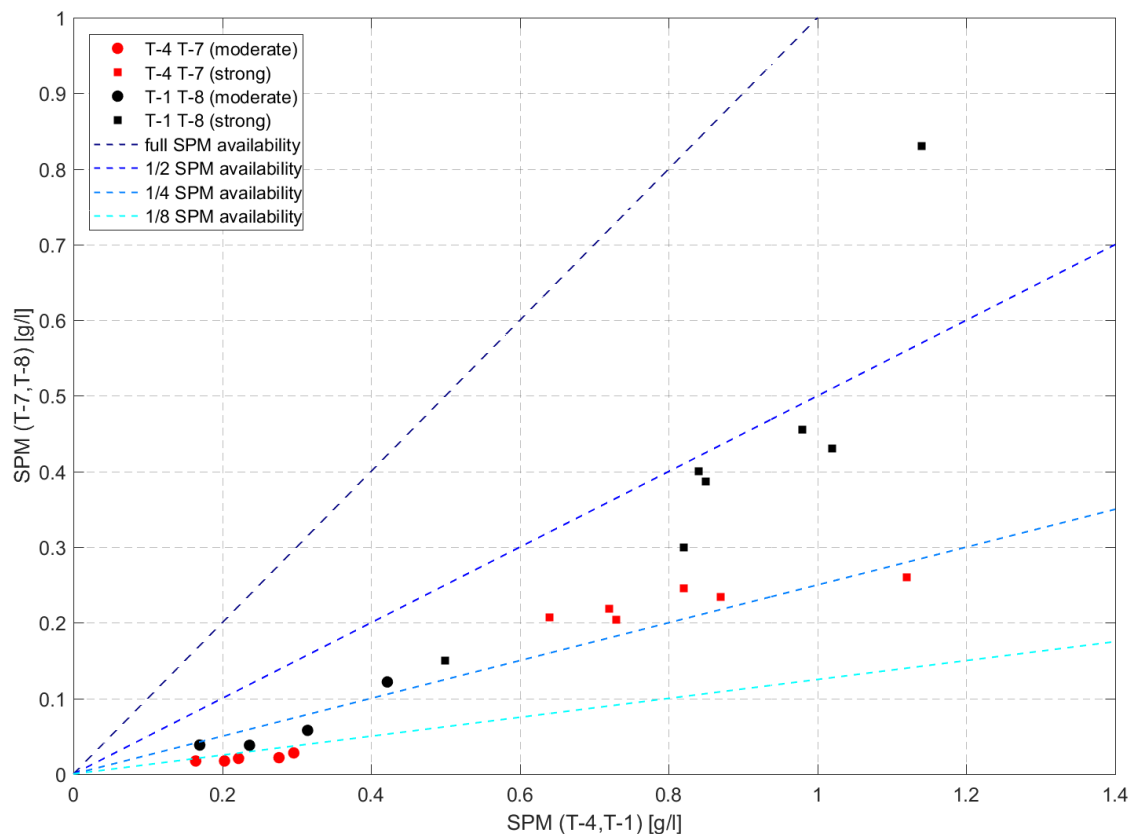


Abbildung 12: Verhältnis zwischen an den Messstationen außerhalb der Hallig Langeneß verfügbarem Gehalt an suspendiertem Material (SPM) und dem zeitgleich auf die Hallig transportierten SPM. Die gestrichelten Linien zeigen unterschiedliche Perzentilwerte der auf der Hallig gemessenen Trübe in Relation zu den Werten im Watt (modifiziert nach Hache et al. eingereicht).

Gleichzeitig besteht eine gute Korrelation zwischen SPM-Werten der jeweiligen Messstation auf der Hallig und der genau dort resultierenden Sedimentakkumulation (Abbildung 13). An der Station T-7 im Westen der Hallig werden allerdings insbesondere bei hohen SPM Gehalten wesentlich geringe Sedimentakkumulationen gemessen als an der Station T-8 im Osten von Langeneß. Dieser Unterschied geht vermutlich auf einen Korngrößeneffekt zurück. Der Zusammenhang zwischen Korngröße und Sedimentakkumulation ist in Abbildung 14 dargestellt. Je größer die abgelagerten Sedimente sind, desto höher ist auch die Sedimentakkumulation insgesamt. Die Korngrößen der an der Station T-7 abgelagerten Sedimente sind aufgrund der Entfernung der Station zur Halligkante und des gegenüber der Station T-8 deutlich höheren Igels geringer als an der Station T-8.

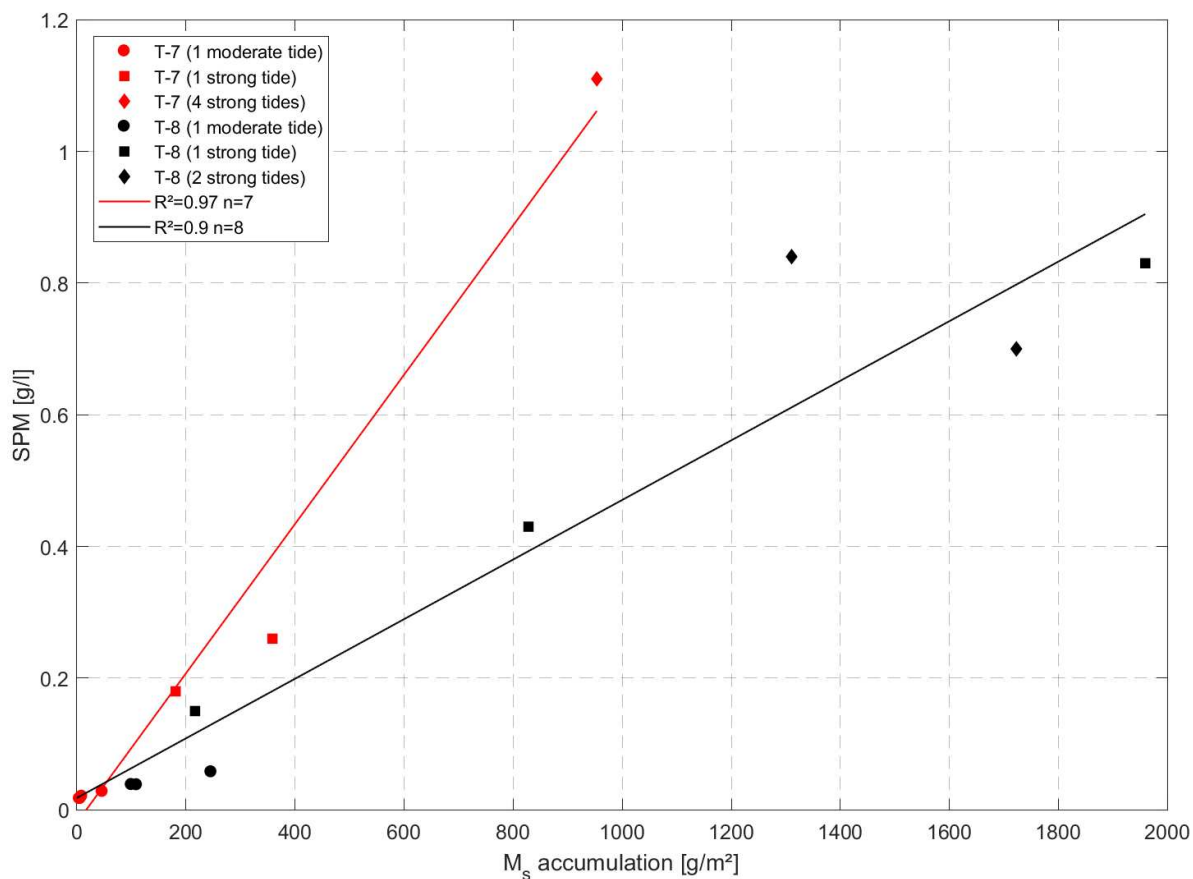


Abbildung 13: Korrelation zwischen SPM-Gehalten und Sedimentakkumulation an den Trübe-
messstationen auf der Hallig Langeneß. Zwischen dem 10.02 und dem 13.02.2020 kam es wäh-
rend des Sturms Sabine zu fünf aufeinanderfolgenden „Land unter“-Tiden. Im Westen von
Langeneß (T-7) war eine Beprobung des Fallenfeldes zwischen den einzelnen Tidezyklen nicht
möglich. Daher erfolgt bei T-7 für diese Sturmflut eine Mittelung über alle fünf Tidezyklen. Im
Osten konnte das Fallenfeld bei Station T-8 jeweils tagsüber beprobt werden und somit erfolgt
hier eine Mittelung von jeweils zwei Tidezyklen (modifiziert nach Hache et al. eingereicht).

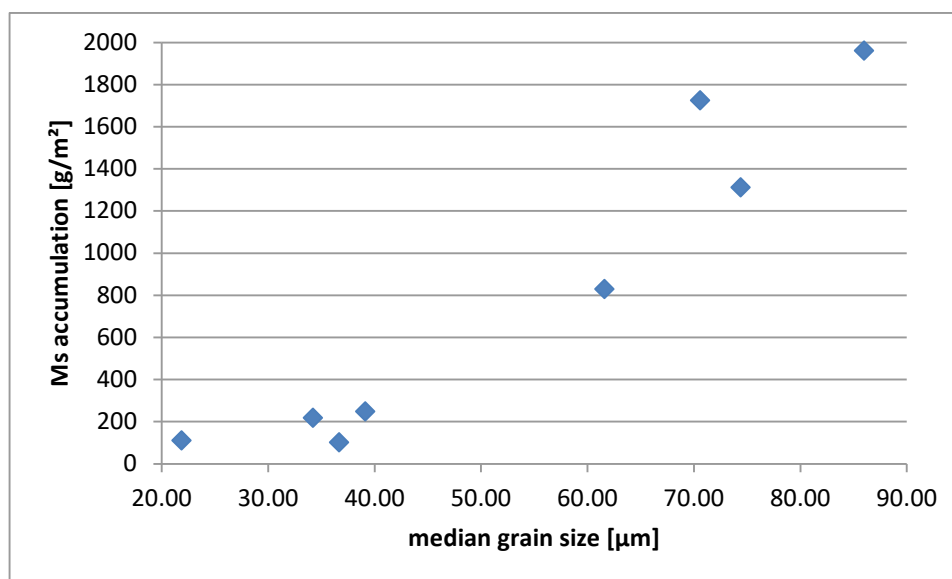


Abbildung 14: Zusammenhang zwischen Sedimentakkumulation und medianer Korngröße in
Sedimentfallen auf der Hallig bei Station T-8 im Westen der Hallig.

3.4 Sedimenttransportmodellierung

Die Modellierung verfolgt das Ziel, den Einfluss von Veränderungen in der Höhe der Halligraustreifen (Igel) auf den Sedimenttransport sowie die Ablagerung und Resuspension individueller Partikel zu zeigen (detailliert in Hache et al. 2021). Abbildung 15 zeigt das verwendete Modellgitter und die Punkte außerhalb der Hallig, an denen fortwährend bei jedem Modellschritt Partikel eingesteuert wurden. Die Auflösung des Gitters ist an die Morphologie des Geländes angepasst. Insbesondere die Halligpriele sind sehr hoch aufgelöst.

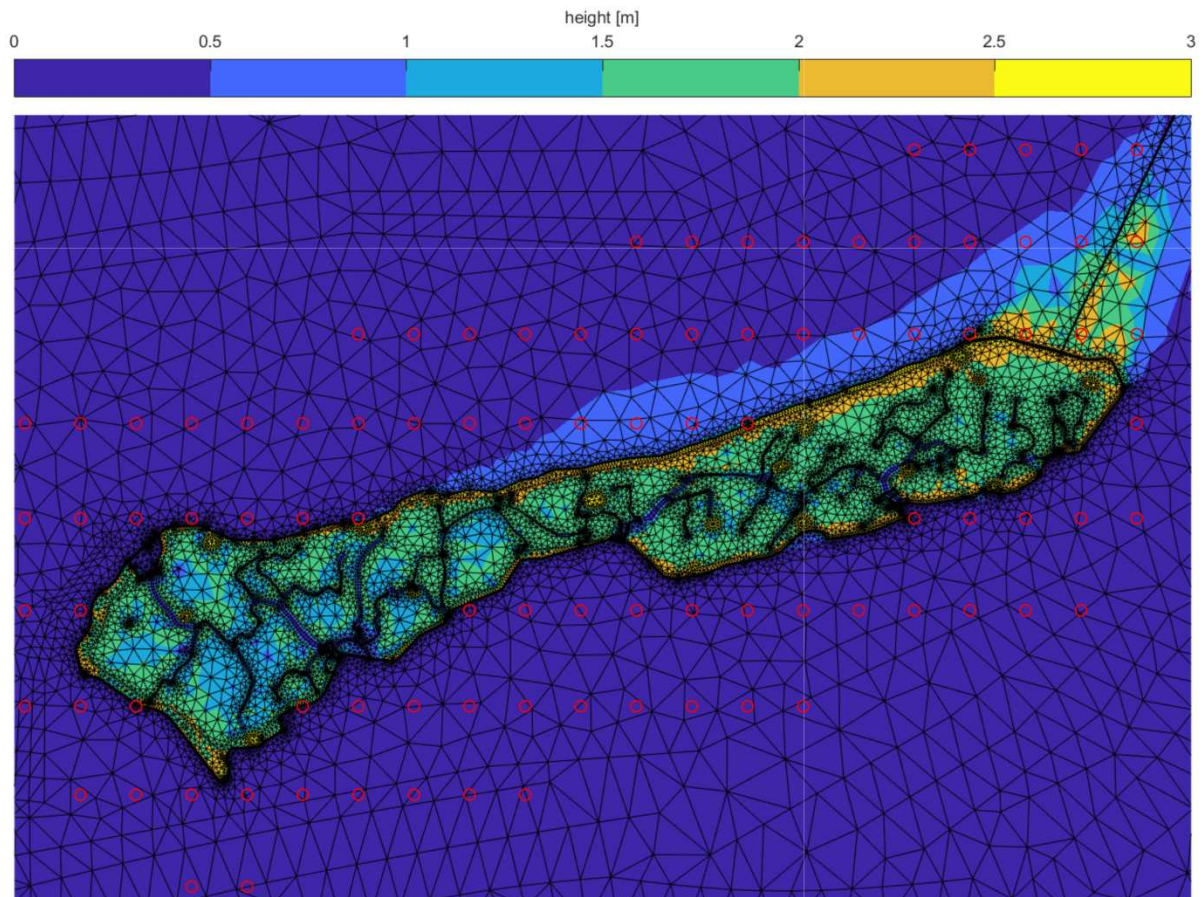


Abbildung 15: Modellgitter und die Punkte, an denen im Modelllauf fortwährend Partikel eingesteuert wurden (rote Kreise) (modifiziert nach Hache et al. 2021).

Eine Änderung der Deckwerkshöhen wurde in denselben Bereichen untersucht wie bei der Messung der Sedimentakkumulation mit Sedimentfallen (Hache et al. 2021) (vgl. Abbildung 10). Dabei wurde in den rot markierten Bereichen (Abbildung 16) die Deckwerkslinie auf die jeweils niedrigste dort aktuell bestehende Höhe angeglichen.

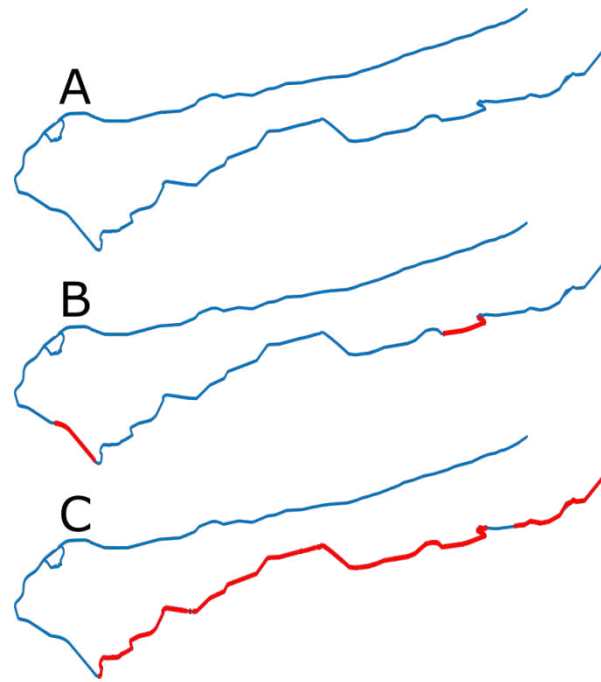


Abbildung 16: Drei Szenarien zur Deckwerkslinie von Langeneß (A = Ist-Zustand). Rot markierte Stellen in B und C wurden während der Modellierung in der Höhe herabgesetzt (modifiziert nach Hache et al 2021).

Anschließend wurden drei Szenarien modelliert. Dabei wurde als Partikelgröße die auf der Hallig vorherrschende mediane Korngröße verwendet (Silt, 30 μm). Es wurde zunächst der Ist-Zustand (A) bezüglich der Deckwerkshöhen für jeweils ein moderates „Land unter“ und eine Sturmflut modelliert. Im zweiten Szenario wurden die Deckwerkshöhen an ausgewählten Stellen angepasst (B) und im dritten wurde die gesamte Deckwerkslinie im Süden der Hallig herabgesetzt (C). Da mit dem Modell keine realen Sedimentakkumulationen berechnet werden können, sind die Ergebnisse nur vergleichend zu interpretieren. Die Anzahl der abgelagerten Partikel für die unterschiedlichen Szenarien sind in Abbildung 17 dargestellt. Während bei einem moderaten „Land unter“, wie es relativ häufig vorkommt, im ersten Szenario nur wenige Partikel vorwiegend nahe der Halligkante im Süden abgelagert werden, erhöht sich die Anzahl während einer Sturmflut deutlich und die Partikel verteilen sich gleichmäßiger über die Halligfläche. Dies entspricht den mit Sedimentfallen erfassten Daten weitgehend und zeigt, dass das Modell realistische Werte liefert. Im zweiten Szenario zeigt sich eine deutliche Erhöhung der abgelagerten Partikelmenge im Bereich des Osterwehls und nur eine sehr geringe Erhöhung im westlichen Bereich der Hallig. Auch das entspricht weitgehend den realen Daten (vgl. Abbildung 10). Dabei nimmt die Partikelanzahl am Osterwehl einerseits zu, andererseits werden die Partikel auch weiter Richtung der Hallig Mitte transportiert. Der Unterschied ist besonders bei moderaten „Land unter“ zu beobachten, während bei Sturmfluten der Effekt des Igels offenbar geringer ist (siehe Vergleich A2 vs. B2 in Abbildung 17). Eine Anpassung des Igels im gesamten Süden der Hallig (Szenario C) wirkt sich bei moderaten Events besonders im Osten der Hallig aus, während bei Sturmflut die Partikel deutlich weiter in den Norden der Hallig transportiert werden als im Ist-Zustand (Vergleich A2 vs. C2).

Abbildung 18 zeigt die kumulierte Anzahl von transportierten, abgelagerten und wieder erodierten Partikeln.

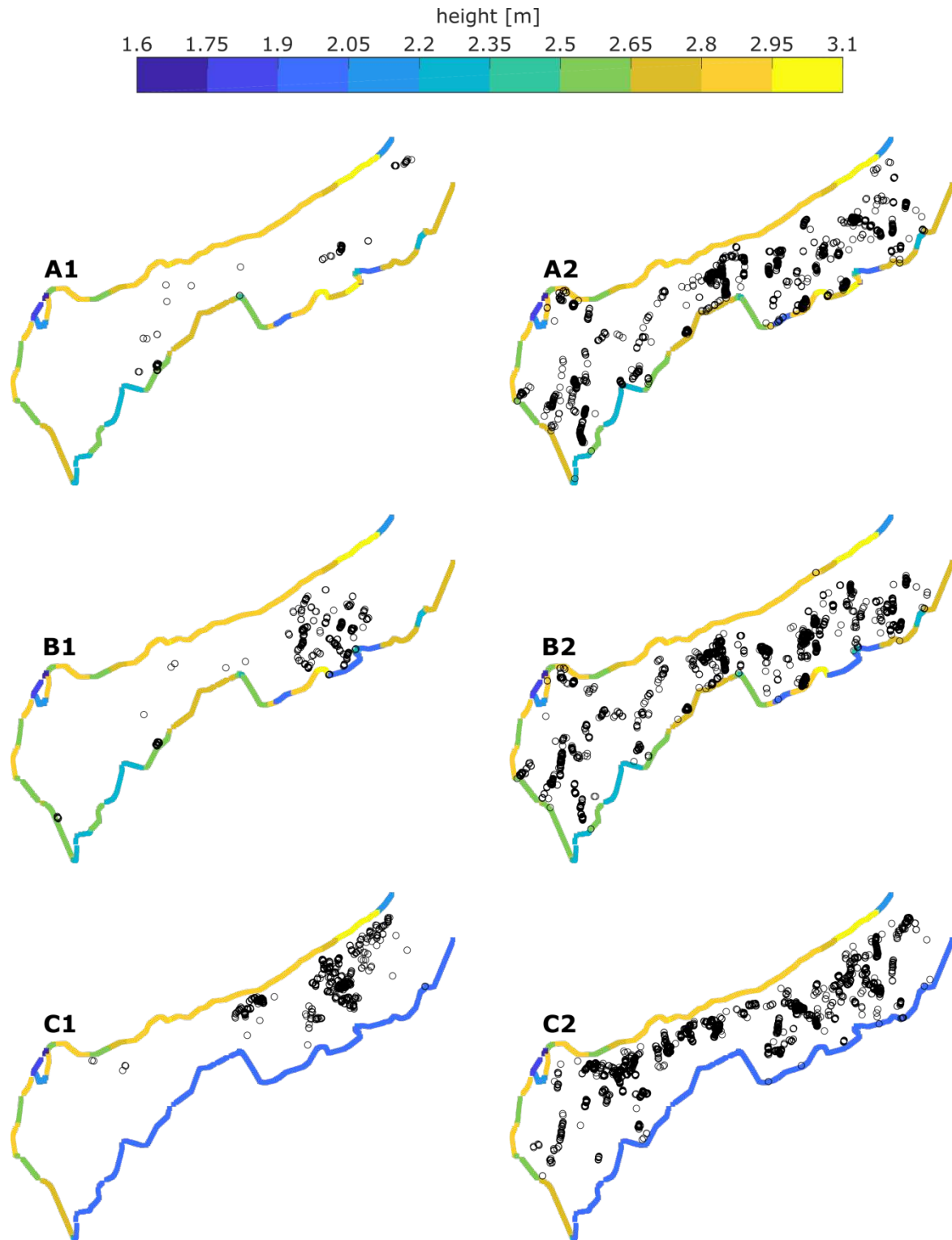


Abbildung 17: Ablagerungsort modellierter Silt-Partikel (30 µm) bei verschiedenen Szenarien. Die Höhen der Deckwerkslinie von Langeneß sind farbig markiert. A: Ist-Zustand der Deckwerke, B: Anpassung nur im Bereich des Sieles am Osterwehl und an der Deichlinie im Westen, C: Anpassung im gesamten Süden der Hallig. A1-C1: moderates „Land unter“, A2-C2: Sturmflut (nach Hache et al. 2021).

Die Modellergebnisse zeigen, dass sich die Sedimentakkumulation besonders bei moderaten „Land untern“ durch Änderung der Deckwerkhöhe in etwa verdoppeln lässt (C1 vs. A1 in Abbildung 18), während sich bei Sturmfluten die Anpassung der Deckwerke auf die

Anzahl der transportierten Partikel kaum auswirkt. Es konnte allerdings auch gezeigt werden, dass bei Sturmfluten ein erheblicher Teil (ca. 20 bis 35 %) der hohen Anzahl an auf die Hallig gelangenden Partikel dort nicht abgelagert wird, sondern mit dem ablaufenden Wasser wieder von der Hallig entfernt wird, während es beim moderaten Ereignis zu keinem Partikelverlust kam. Hier zeigt sich ein weiterer Ansatzpunkt für die Erhöhung der Sedimentakkumulation. Es steht zu vermuten, dass der Sedimentverlust verringert werden könnte, wenn nach Sturmfluten das ablaufende Wasser gebremst würde.

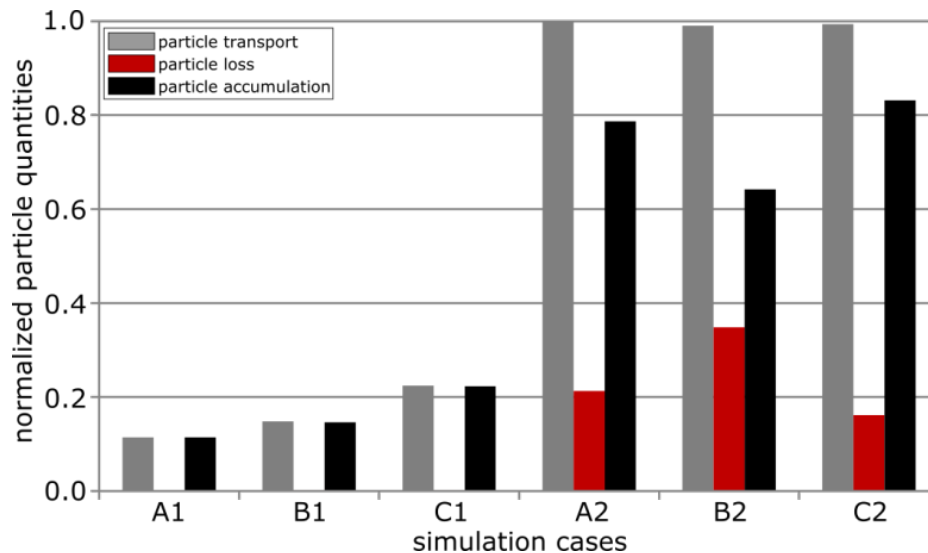


Abbildung 18: Kumulierte modellierte Silt-Partikelanzahl (30 μm) für unterschiedliche Szenarien, normiert auf die höchste Säule (A2). A: Ist-Zustand der Deckwerke, B: Anpassung nur im Bereich des Sieles am Osterwehl, C: Anpassung im gesamten Süden der Hallig. A1–C1: moderates „Land unters“, A2–C2: Sturmflut (nach Hache et al 2021).

4 Schlussfolgerung und weiterer Forschungsbedarf

Die Studie zeigt gute und in sich konsistente Ergebnisse bezüglich der gemessenen Trübungswerte in der Wassersäule, der gemessenen Sedimentakkumulation auf der Hallig sowie der Modellierung des Partikeltransportes. Die eingangs gestellten Fragen konnten weitgehend beantwortet werden. Das entwickelte Trübungmessnetzwerk hat über annähernd 3,5 Jahre bei nur geringen Ausfallzeiten kontinuierlich Daten in überzeugender Qualität geliefert. Aus den Rohdaten konnten durch individuelle Kalibration der einzelnen Sensoren an den jeweiligen Stationen SPM-Daten erzeugt werden, die die räumliche und zeitliche Variation der suspendierten Sedimentmenge um Hallig Langeneß abbilden. Insbesondere Stürme aus südwestlicher Richtung sorgen mit zunehmender Windgeschwindigkeit für ein gesteigertes SPM-Potential in der Wassersäule, das im Falle eines „Land unters“ auf die Hallig transportiert werden kann. Im Westen der Hallig werden die SPM-Gehalte weniger stark von den meteorologischen Bedingungen beeinflusst als im Süden und Norden der Hallig. Der Einfluss der Strömung in dem westlich an der Hallig entlanglaufenden Priel dominiert hier offenbar die Trübungswerte. Es zeigte sich eine sehr gute Korrelation zwischen gemessenen SPM-Gehalten und der realen Sedimentakkumulation am Ort der Messung auf der Hallig. Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass sich während eines „Land unters“ die SPM-Gehalte im Überflutungswasser auf der Hallig deutlich von denen des Wassers außerhalb der Hallig unterscheiden. Nur etwa 10 bis 50 % des zur Verfügung

stehenden SPM-Potentials gelangt tatsächlich auf die Hallig und sorgt dort für eine Sedimentakkumulation. Dabei stellt die Halligkante mit den darauf befindlichen Deckwerken offenbar die entscheidende Hürde da. Sowohl Korngröße als auch Menge der abgelagerten Sedimente sind hinter höheren Igeln durchgehend geringer als hinter niedrigeren. Die Ergebnisse der Modellierung zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Dies legt den Schluss nahe, dass besonders bei den häufig auftretenden moderaten „Land untern“ eine deutliche Steigerung der Sedimentakkumulation um das doppelte möglich wäre, wenn die Deckwerke auf der Südseite der Hallig herabgesetzt würden. Die Modellergebnisse legen weiterhin den Schluss nahe, dass unabhängig von der Veränderung der Deckwerkshöhen bei den seltener auftretenden Sturmfluten ein erhebliches Potential an Sedimenten zur Verfügung steht, das durch das ablaufende Überflutungswasser von der Hallig gespült wird.

Die Ergebnisse der Modellierung sollten unter natürlichen Bedingungen getestet und validiert werden. Dazu könnten an strategischen Stellen der Hallig die Raustreifen niedriger gestaltet und eine angepasste Steuerung des ablaufenden Wassers bei Sturmfluten umgesetzt werden. Es sollten weiterhin Maßnahmen getroffen werden, die bei kleinen „Land untern“ das Überflutungswasser ungehindert auf die Hallig strömen lassen und bei Sturmfluten das ablaufende Wasser bremsen. Denkbar wäre eine variable Verbauung der Priele vor den Sieltoren und/oder eine variable Sieltorsteuerung.

5 Danksagung

Die Autoren danken allen Bewohner*innen von Langeneß für ihre freundliche Unterstützung. Ohne die Gewährung von Zutrittsrechten für Fennen und Warfen wäre diese Studie nicht möglich gewesen. Insbesondere danken wir Hans-Werner Johannsen für die Versorgung unserer Zentralstation mit Strom. Wir möchten uns bei Britta und Honke sowie Helgard und Frerk Johannsen für ihre Gastfreundschaft und für vielfältige Hilfestellungen bei der Durchführung der Geländearbeiten bedanken. Dem BMBF wird für die finanzielle Förderung gedankt (Projekt *Living Coast Lab Hallig*, 03F0759C) und dem KFKI und den Mitgliedern der Projektbegleitenden Gruppe für ihre konstruktiven Anregungen. Für die Durchführung von „Land unter“- und Sturmflutsimulationen kam das Softwarepaket MIKE21® zum Einsatz, das uns freundlicherweise von DHI-WASY zur Verfügung gestellt wurde. Jörg Gutkuhn (Fa. Argus) und Lothar Laake sowie allen Mitarbeitern der Metallwerkstatt des Geowissenschaftlichen Zentrums Göttingen gebührt Dank und Anerkennung für herausragende technische und handwerkliche Arbeiten an dem Trübemesssystem.

6 Literaturverzeichnis

Arns, A.; Wahl, T.; Dangendorf, S.; Jensen, J.: The impact of sea level rise on storm surge water levels in the northern part of the German Bight. In: *Coastal Engineering*, 96, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.12.002>, 2015a.

Arns, A.; Wahl, T.; Haigh, I. D.; Jensen, J.: Determining return water levels at ungauged coastal sites. A case study for northern Germany. In: *Ocean Dynamics*, 65 (4), 539–554. <https://doi.org/10.1007/s10236-015-0814-1>, 2015b.

Arns, A.; Dangendorf, S.; Jensen, J.; Talke, S.; Bender, J.; Pattiaratchi, Ch.: Sea-level rise induced amplification of coastal protection design heights. In: *Scientific reports*, 7, 40171. <https://doi.org/10.1038/srep40171>, 2017.

Carstens, J. S.; Rüßmann, A.-L.: Wattkartierung um Hallig Langeneß - Bestimmung der Korngrößenverteilung, Karbonatgehalt und organischem Kohlenstoff an ausgewählten Profilen. Bachelorarbeit im Studiengang Geowissenschaften der Georg-August-Universität Göttingen, 2018.

Deicke, M.; Karius, V.; Eynatten, H. von: Bestimmung der Sedimentaufwachsrate auf den Halligen Hooe, Langeneß, Nordstrandischmoor und Süderoog Sedimentakkumulation Halligen (SAHALL). Endbericht. Georg-August Universität Göttingen, 2009.

Down, R. D.; Lehr, J. H.: *Environmental Instrumentation and Analysis Handbook*. Chapter 24. Turbidity Monitoring, 511–547. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2005.

Downing, J. P.: Twenty-five years with OBS sensors. The good, the bad, and the ugly. In: *Continental Shelf Research*, 26, (17-18), 2299–2318. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.07.018>, 2006.

Downing, J. P.; Beach, R. A.: Laboratory apparatus for calibrating optical suspended solids sensors. In: *Marine Geology*, 86 (2-3), 243–249. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(89\)90053-4](https://doi.org/10.1016/0025-3227(89)90053-4), 1989.

Gardner, W. D.: Field assessment of sediment traps. In: *Journal of Marine Research*, 38, 41–52, 1980a.

Gardner, W. D.: Sediment trap dynamics and calibration: a laboratory evaluation. In: *Journal of Marine Research*, 38, 17–39, 1980b.

Hache, I.; Karius, V.; Eynatten, H. von: Storm surge induced sediment accumulation on marsh island in the southeastern North Sea: Implications for coastal protection. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, eingereicht.

Hache, I.; Niehüser, S.; Karius, V.; Arns, A.; Eynatten, H. von: Assessing sediment accumulation at inundated anthropogenic marshland in the southeastern North Sea: using particle tracking on modified coastal protection structures. In: *Ocean and Coastal Management*, 208. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105631>, 2021.

Hache, I.; Karius, V.; Eynatten, H. von: Suspended particulate matter for sediment accumulation on inundated anthropogenic marshland in the southern North Sea – Potential, thresholds and limitation. In: *Continental Shelf Research*, 207, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2020.104214>, 2020.

Hache, I.; Karius, V.; Gutkuhn, J.; Eynatten, H. von: The development and application of an autonomous working turbidity measurement network: Assessing the spatial and temporal distribution of suspended particulate matter on tidal flats in the North Frisian Wadden Sea. In: *Continental Shelf Research*, 176, 36–50. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.02.010>, 2019.

Kineke, G. C.; Sternberg, R. W.: Measurements of high concentration suspended sediments using the optical backscatterance sensor. In: *Marine Geology*, 108 (3-4), 253–258. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(92\)90199-R](https://doi.org/10.1016/0025-3227(92)90199-R), 1992.

Poerbandono, P.; Mayerle, R.: Composition and Dynamics of Sediments in Tidal Channels of the German North Sea Coast. In: *Die Küste*, 69, 63–91, 2005.

Schindler, M.: Challenges and perspectives of the North Frisian Halligen Hooe, Langeneß and Nordstrandischmoor. Marshland accretion and adaptation capacity to sea-level-rise. Dissertation. University Göttingen, Göttingen, 2014.

Schindler, M.; Karius, V.; Arns, A.; Deicke, M.; Eynatten, H. von: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part II. The adaptation capacity of the North Frisian Halligen to sea level rise. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 151, 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.027>, 2014a.

Schindler, M.; Karius, V.; Deicke, M.; Eynatten, H. von: Measuring sediment deposition and accretion on anthropogenic marshland – Part I. Methodical evaluation and development. In: *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 151, 236–245. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.08.029>, 2014b.

Schindler, M.; Willim, K.: Berechnung langjähriger Überflutungshäufigkeiten für die Halligen Hooe, Langeneß und Nordstrandischmoor auf Basis regionaler Pegel­daten. In: *Coastline Reports*, 24, 53–65, 2015.

Bodenkundliche Kartieranleitung. Mit 103 Tabellen. With assistance of Herbert Sponagel. 5., verb. und erw. Aufl. Stuttgart: Schweizerbart, 2005.

Stanev, E. V.; Badewien, T. H.; Freund, H.; Grayek, S.; Hahner, F.; Meyerjürgens, J. et al.: Extreme westward surface drift in the North Sea. Public reports of stranded drifters and Lagrangian tracking. In: *Continental Shelf Research*, 177, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.03.003>, 2019.

Sternberg, R. W.; Johnson, R. V.; Cacchione, D. A.; Drake, D. E.: An instrument system for monitoring and sampling suspended sediment in the benthic boundary layer. In: *Marine Geology*, 71, (3-4), 187–199. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(86\)90069-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(86)90069-1), 1986.

Warren, I. R.; Bach, H. K.: MIKE 21: a modelling system for estuaries, coastal waters and seas. In: *Environmental Software*, 7(4), 229–240. DOI: 10.1016/0266-9838(92)90006-P, 1992.